پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی میکروسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین به‌وسیلهٔ مدل ریاضی★

(یادداشت پژوهشی)

عباس حق‌اللهی[۱] امیر طریقت[۲] محمد شفیعی زاده[۳]

چکیده *این مقاله، تأثیرات متقابل میکروسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین (SBR) را بر مقاومت فشاری بتن بررسی می‌نماید. تحلیل نتایج مقاومت فشاری ۳۲ مخلوط بتنی با ۲ نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۴۵ و ۰/۳۵) و چهار درصد جایگزینی میکروسیلیس (۱۰٪، ۷/۵٪، ۵٪، ۰٪) و چهار درصد پلیمر استایرن بوتادین (۱۵٪، ۱۰٪، ۵٪، ۰٪) بررسی شده است. یک مدل ریاضی براساس قانون آبرامز، به‌منظور پیش‌بینی مقاومت بتن‌های حاوی SBR و میکروسیلیس پیشنهاد شده است. این مدل ساده، ممکن است به‌عنوان راهنمایی مناسب برای اختلاط مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و پلیمراستایرن بوتادین به‌کار رود.*

واژه‌های کلیدی بتن، میکروسیلیس، پلیمر استایرن بوتادین، مقاومت فشاری، مدل ریاضی.

Prediction Compressive Strength of Concretes Containing Silica Fume and Styrene-butadiene Rubber (SBR) with a Mathematical Model

A.Haghollahi A.Tarighat M. Shafieyzadeh

Abstract *This paper deals with the interfacial effects of silica fume (sf) and styrene-butadiene polymer (SBR) on compressive strength of concrete. Analyzing the compressive strength results of 32 concrete mixes performed over two water-binder ratios (0.35, 0.45), four percentages replacement of silica fume (0%, 5%, 7.5%, 10%) and four percentages of SBR (0%, 5%, 10%, 15%) were investigated. A mathematical model base on Abrams' law has been proposed for evaluation strength of silica fume-SBR concretes. This simplified model might serve as useful guides for commixture concrete admixtures containing of silica fume and SBR. The accuracy of the proposed model is investigated.*

Key Words Concrete, Silica Fume, SBR, Compressive Strength, Mathematical Modeling.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۸/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۱/۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی. haghollahi@srttu.edu

(۲) استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۳) دانش آموختهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

مقاومت بتن تحت تأثیر عوامل زیادی از قبیل ترکیب و عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، سنگدانه، سن و دمای عمل‌آوری قرار می‌گیرد. به‌علت زیاد بودن تعداد متغیرها هیچ رابطه‌ای (مدل ریاضی) وجود ندارد که بتواند تأثیرات تمام این فاکتورها را به‌صورت کمی، درنظر بگیرد [1].

قانون نسبت آب به سیمان آبرامز در سال ۱۹۱۸، هنوز به‌عنوان یک رابطهٔ اصلی در تاریخ تکنولوژی بتن مطرح می‌باشد. ساده‌ترین عاملی که بیشترین تأثیر را در مقاومت بتن می‌گذارد، نسبت آب به سیمان می‌باشد. در ابتدا بتن با مخلوط نمودن سیمان، سنگدانه و آب ساخته می‌شد و استفاده از مواد مضاف ناشناخته بود. تنها مادهٔ چسبنده، سیمان بود. امروزه، بتن‌های جدید حاوی مواد مضاف معدنی و لاتکس‌ها به دلایل زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد، مقاومت سایشی و دوام را افزایش و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند، [2-5] لذا لازم است رابطهٔ آبرامز اصلاح شود.

در گذشته تحقیقات زیادی در رابطه با مخلوط‌های بتن و بتن‌های حاوی مواد مضاف انجام شده و بعضاً روابط ریاضی بین مقاومت بتن و نسبت‌های ترکیب مواد تشکیل‌دهنده ارائه شده است، لیکن روابطی که شامل چند پارامتر باشند بسیار کم هستند که در این تحقیق تلاش بر انجام آن و ارائهٔ رابطه براساس چند پارامتر می‌باشد.

هم‌چنین به‌منظور افزودن پلیمرها به مخلوط‌های سیمانی دو روش مختلف پیشنهاد شده است[6]:

۱) ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان (w/c) به‌منظور حصول به هیدراتاسیون مشابه خمیر سیمان.

۲) ثابت نگه داشتن تراکم مخلوط، با تنظیم نسبت آب به سیمان.

در این تحقیق، نسبت آب به مواد سیمانی، ثابت (۰/٤٥ و ۰/۳۵) در نظر گرفته شده است و تأثیرات امولسیون SBR (styrene-butadiene polymer) که برای افزایش مقاومت سایشی بتن به‌ویژه در کف‌های بتنی به مخلوط بتن اضافه می‌شود) و هم‌چنین میکروسیلیس (silica fume) یک نوع پوزولان مصنوعی که به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن استفاده می‌شود و موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن می‌شود) بر روانی و مقاومت فشاری بتن بررسی شده است و یک رابطه بین مقاومت فشاری با نسبت پلیمر، میکروسیلیس، آب به مواد سیمانی و زمان نگه‌داری در آب، پیشنهاد شده است.

برنامه و روند آزمایش

در این تحقیق، دو سری نمونه با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/٤٥ و ۰/۳۵ تدارک دیده شده‌اند. به‌منظور بررسی تأثیرات متقابل میکروسیلیس و SBR بر مقاومت فشاری، آزمایش‌ها براساس چهار سطح جایگزینی میکروسیلیس (۱۰٪، ۷/۵٪، ۵٪، ۰٪) و چهار سطح SBR (۱۵٪، ۱۰٪، ۵٪،۰٪) انجام پذیرفته‌اند.

نمونه‌های مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری قالب‌ریزی شده‌اند. قبل از قالب‌ریزی، درشت‌دانه، ماسه و دوغاب میکروسیلیس مخلوط شدند. سپس سیمان، لاتکس SBR و بقیهٔ آب به‌همراه فوق روان‌کننده درون میکسر ریخته شدند و با ارتعاش مکانیکی متراکم شدند.

نمونه‌ها تحت سه روش عمل‌آوری زیر قرار داده شده‌اند.

۱) ۷ روز عمل‌آوری در آب ۲۰ درجه و ۵۳ روز عمل‌آوری خشک در دمای ۲۰ درجه.

۲) ١٤ روز عمل‌آوری در آب ۲۰ درجه و ٤٦ روز عمل‌آوری خشک در دمای ۲۰ درجه.

۳) ۲۸ روز عمل‌آوری در آب ۲۰ درجه و ۳۲ روز عمل‌آوری خشک در دمای ۲۰ درجه.

لاتکس SBR به‌عنوان یک محلول پخش‌کنندهٔ پلیمری، هیدراتاسیون و استحکام مجدد را تحت شرایط عمل‌آوری خشک، ترجیح می‌دهد[7]. هیدراتاسیون

سیمان و فیلم پلیمری در بتن‌های اصلاح‌شده با افـزایش سن عمل‌آوری گسترش می‌یابـد کـه منجـر بـه افـزایش مقاومت مـی‌شـود. بـه عبـارت دیگـر، ترکیـب مناسـب عمل‌آوری مرطوب و عمل‌آوری خشک بـرای گسـترش مقاومت بتن‌های اصلاح شده با پلیمر مناسب مـی‌باشـد. یک ماتریس دوگانه برای هر دو فرآیند تشکیل می‌شـود [4,8-10]. نمونـه‌هـا براسـاس اسـتاندارد BS آزمـایش شده‌اند.

مواد

مواد استفاده شده در این تحقیق عبارتند از:

سیمان پرتلند (تیپ یک) تولیـد کارخانـهٔ تهـران و میکروسـیلیس تولیـد کارخانـهٔ دلیجـان مـی‌باشـد کـه مشخصات میکروسیلیس و سیمان در جـدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱ مشخصات سیمان و میکروسیلیس

Composition (%)	Cement	Silica fum
Sio2	21.46	91.7
Al2o3	5.55	1.0
Fe2o3	3.46	1.0
Mgo	1.86	1.8
Cao	63.95	0.9
So3	1.42	0.87
K2o3	0.54	---
Na2o	0.26	---
C3S	50.96	---
C2S	23.1	---
C3A	8.85	---
C4AF	10.53	---

درشت‌دانه با حداکثر اندازهٔ اسمی ۱۷ میلـی‌متـر و ریزدانه با مـدول نرمـی ۳/۰۱ در ایـن آزمـایش اسـتفاده شده‌انـد. وزن مخصـوص و جـذب آب درشـت‌دانـه و ریزدانه به‌ترتیب ۲/۵۵ و ٦/١٪ ، ۲/۲۵ و ٢/٤٪ می‌باشند. از یک کاهندهٔ آب با نام تجاری گلنیوم ۱۱۰P از شرکت ب – آ- اس – اف، برای تنظیم روانی مخلوط‌های بـتن استفاده شده است. پایه و اساس این فوق‌روان‌کننده یک پلیمـر کربوکسـیلیک اتـر بـا زنجیرهـای جـانبی طویـل می‌باشد.

لاتکس پلیمری استفاده‌شده، پلیمر استایرن بوتادین (SBR) با نام تجـاری Rheomix 141p از شـرکت ب – آ- اس – اف می‌باشد که مشخصـات آن در جـدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات SBR

Density (gr/cm²)	Mean particle Size (micron)	Butadiene Content	PH
1.01	0.17	40%	10.5

هـم‌چنـین براسـاس طـرح اخـتلاط انجـام شـده نسبت‌های مواد و مصالح مصـرفی در جـدول (۳) ارائـه شده است.

جدول ۳ درصد اختلاط بتن

	مواد سیمانی در ۱مترمکعب بتن (kg)	نسبت آب به سیمان	درصد شن	درصد ماسه
ترکیب ۱	٤٠٠	٠/٣٥	٠/٣٥	٠/٤٣
ترکیب۲	٤٠٠	٠/٤٥	٠/٣٨	٠/٣٨

نتایج آزمایش و بحث راجع به آن

تأثیرات میکروسیلیس و SBR بر روانی بتن

میکروسیلیس روانی بتن را کـاهش مـی‌دهـد امـا SBR، روانی بتن را افزایش می‌دهد. افزودن ۱۵ درصد SBR به نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/٤٥، بتن خـود متراکم ایجاد می‌نمایـد. تـأثیر SBR در افـزایش روانـی بتن، بیشتر از تأثیر کاهندهٔ میکروسیلیس در روانـی مـی-باشد.

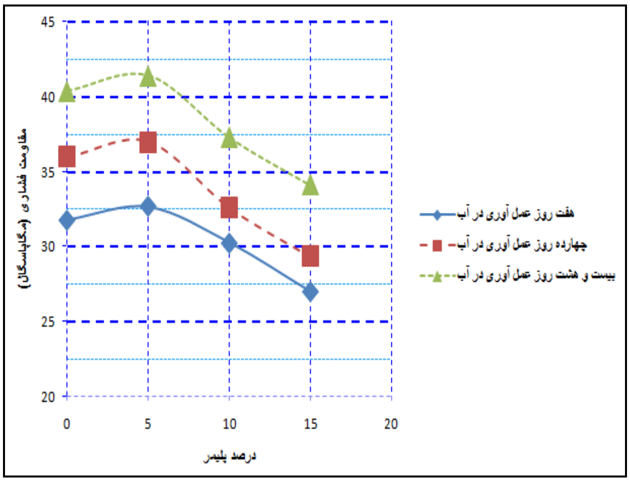
تأثیرات SBR بر مقاومت فشاری

در نسـبت پلیمـر بـه سـیمان (۵٪) ، مقاومـت فشـاری نمونه‌های اصـلاح‌شـده برابـر و حتـی انـدکی بـالاتر از

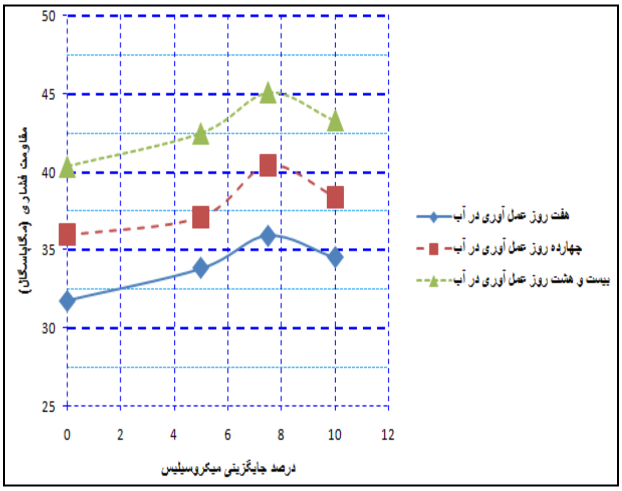
نمونه‌های فاقد پلیمر می‌باشد (شکل ۱). تأثیر پرکنندگی پلیمر، باعث افزایش اندک مقاومت فشاری می‌شود. مقاومت فشاری عمدتاً بااستفاده از نیروهای پیوستگی ایجاد شده توسط هیدراتاسیون سیمان ایجاد می‌شود [11-13]. به‌نظر می‌رسد که در نسبت پلیمر به سیمان ۰/۰۵، پیوستگی فیلم پلیمری فقط از طریق پل‌های کوچک روی تعداد محدودی از حفرات انجام می‌پذیرد. اگرچه ساختار بین فیلم پلیمری و سیمان هیدراته شده در نسبت پلیمر به سیمان (۱۰٪)، گسترش می‌یابد ولی مقاومت فشاری بتن درمقایسه با بتن فاقد پلیمر کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، افزودن لاتکس SBR به بتن، یک کاهش در مقاومت فشاری ایجاد نموده است که ناشی از ظرفیت پایین‌تر لاتکس نسبت به خمیر سیمان می‌باشد.

تأثیرات میکروسیلیس بر مقاومت

بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت بتن به‌علّت فعالیت بالای پوزولانی میکروسیلیس و توانایی پرکنندگی آن مشاهده می‌شود [14-16]. مقاومت فشاری بتن میکروسیلیسی به‌طور پیوسته نسبت به بتن مرجع افزایش می‌یابد و در سطح ۷/۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس به حداکثر مقدار خود می‌رسد (شکل ۲). تأثیر میکروسیلیس در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، کمتر از نسبت آب به سیمان ۰/٤٥ می‌باشد.



شکل ۱ تأثیر نسبت پلیمر به سیمان بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و حاوی صفر درصد میکروسیلیس



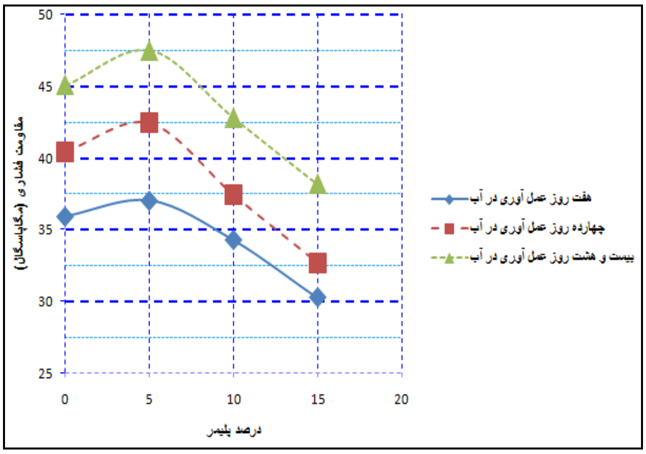
شکل ۲ تأثیر نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و حاوی صفر درصد پلیمر

تأثیرات متقابل میکروسیلیس و SBR در مقاومت فشاری بتن

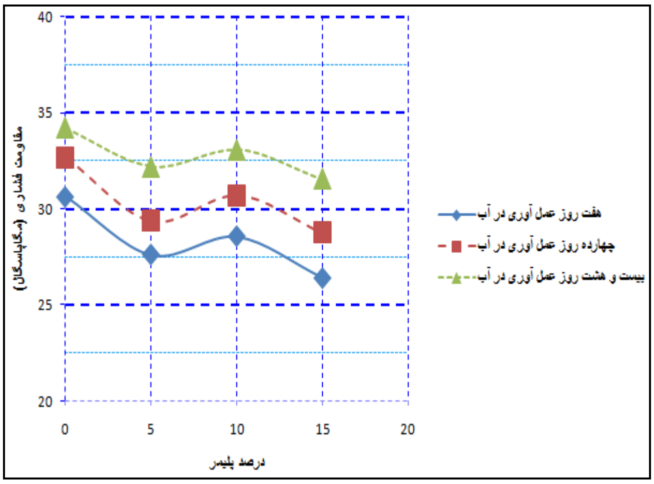
مقاومت بتن تحت تأثیر نسبت پلیمر و میکروسیلیس به مواد سیمانی قرار می‌گیرد. هنگامی که نسبت پلیمر به مواد سیمانی ثابت و معین می‌باشد، میکروسیلیس مقاومت بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. درصدی از میکروسیلیس که مقاومت فشاری را بهینه می‌نماید ۷/۵ درصد ثابت می‌ماند (شکل ۳).

در نمونه‌های با ۵٪ پلیمر و ۷/۵٪ یا ۱۰٪ میکروسیلیس (آب به مواد سیمانی ۰/۴۵) ، کاهش در مقاومت فشاری مشاهده می‌شود (شکل ٤). هوازایی فوق‌روان‌کننده، موجب کاهش در مقاومت فشاری شده است. (در ساخت این نمونه‌ها، نسبت فوق‌روان‌کننده ثابت حفظ شده بود.)

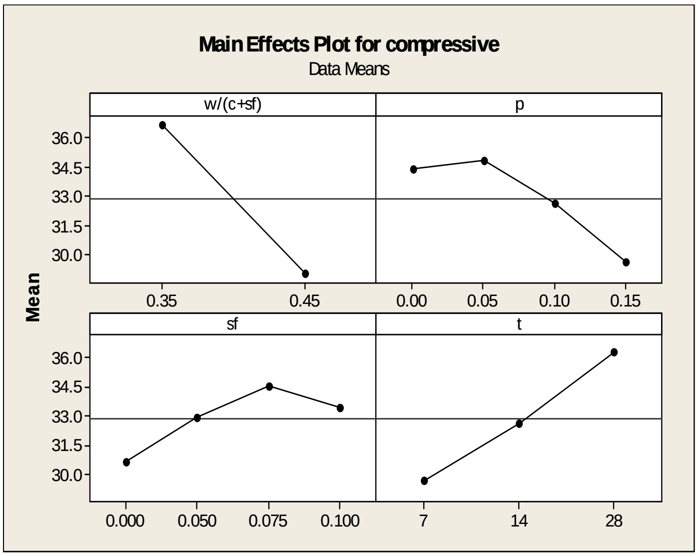
در ۱۵٪ پلیمر، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/٤۵ به ۰/۳۵، مقاومت فشاری با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی ناشی از تأثیر روان‌کنندگی SBR جبران شده است. هر دو پدیده باهم، مقاومت فشاری را ثابت نگه می‌دارد.



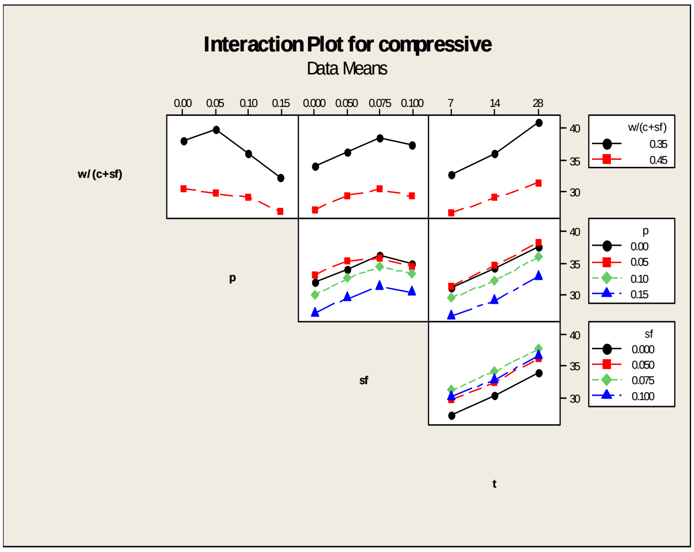
شکل ۳ تأثیر نسبت پلیمر به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و حاوی هفت و نیم درصد میکروسیلیس



شکل ٤ تأثیر نسبت پلیمر به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/٤۵ و حاوی هفت و نیم درصد میکروسیلیس



شکل ۵ نمودار تأثیرات اصلی برای مقاومت فشاری



شکل ٦ تأثیرات متقابل فاکتورها در مقاومت فشاری

ارزیابی تأثیر پارامترها و تأثیرات متقابل آنها در مقاومت فشاری

تأثیرات اصلی هر فاکتور در شکل شمارهٔ (۵) نشان داده شده است. این نمودار، میانگین مقاومت فشاری را در سطوح مختلف هر فاکتور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/٤۵ به ۰/۳۵، مقاومت فشاری را در حدود ٪۲٦ افزایش می‌دهد.

به‌طور متوسط، ۷/۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس مقاومت فشاری را در حدود ٪۱۳ افزایش می‌دهد. همچنین افزودن ٪۱۵ پلیمر SBR، مقاومت فشاری را در حدود ٪۱٤ کاهش می‌دهد.

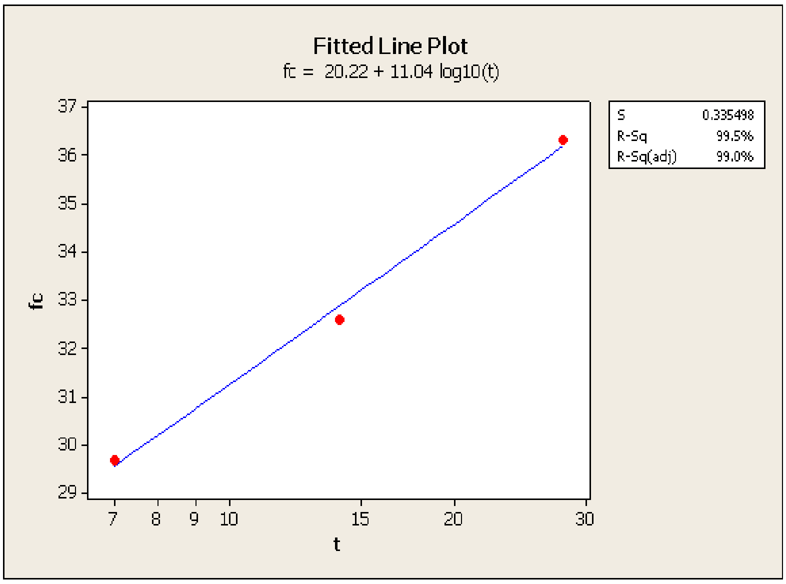
یک نمودار ساده از تأثیرات متقابل فاکتورها در مقاومت فشاری در شکل شماره (٦) نشان داده شده است. خطوط موازی در یک نمودار تأثیر متقابل نشان

می‌دهد که تـأثیر متقـابلی بـین فاکتورهـا وجـود نـدارد. انحراف بیشتر خطوط از وضعیت موازی، درجهٔ بالاتری از تأثیر متقابل را نشان می‌دهد. در چنین وضعیتی، پاسخ در یک سطح فاکتور بستگی به سـطوح دیگـر فاکتورهـا دارد. برای مثـال، بـین SBR و میکروسـیلیس در سـطح ۱۰٪ SBR با سایر سطوح یک تأثیر متقابل مشاهده شده است. (یک کاهش در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵٪ SBR و ۷/۵٪ میکروسیلیس اتفاق افتاده است).

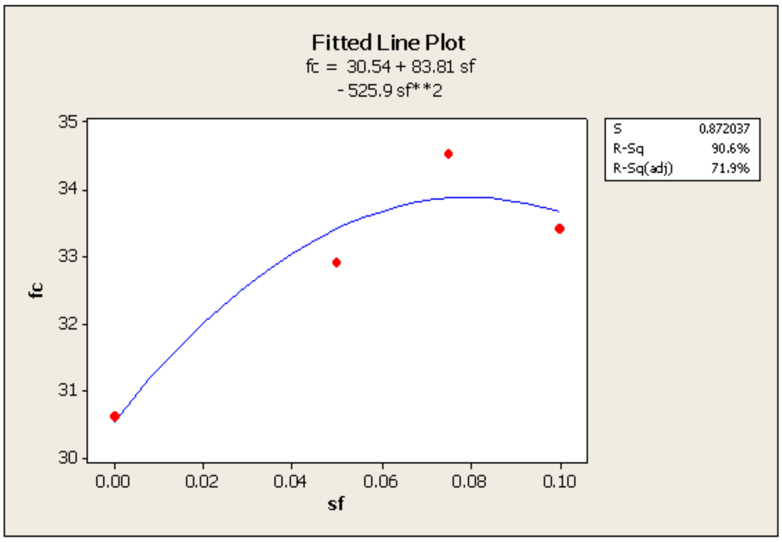
مدل ریاضی

فاکتورهای اصلی که مقاومت فشاری بتن را تحت تـأثیر قرار می‌دهند، نسبت‌های آب، پلیمـر، میکروسـیلیس بـه مواد سیمانی و زمان نگه‌داری نمونـه در آب مـی‌باشـند. براساس رابطهٔ کلاسـیک آبرامـز، رابطـهٔ معکوسـی بـین مقاومت فشـاری و نسـبت آب بـه سـیمان وجـود دارد [17,18] تعداد زیادی از محققان رابطهٔ مقاومت فشـاری و زمان را با یک رابطه لگاریتمی نشان داده‌انـد. تعـدادی از محققان معادلات توانی برای تـأثیر میکروسـیلیس بـر مقاومت فشاری پیشنهاد نموده‌اند [19,20] امّا ارتباط بین مقاومت فشاری با تمام فاکتورها به‌خوبی شـناخته شـده نمی‌باشـد. در چنـین وضـعیتی کـه هـیچ رابطـهٔ اصـلی شناخته‌شده‌ای بـین مقاومـت فشـاری بـا تمـام متغیرهـا وجـود نـدارد. نمودارهـای پراکنـده تهیـه شـده‌انـد و میانگین‌های مقادیر در نمودارها نشان داده می‌شوند.

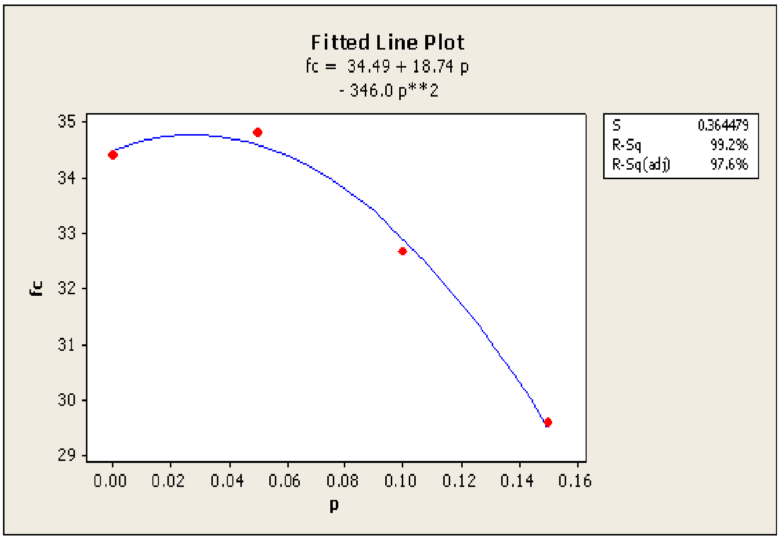
نمودارهای پراکنده برای تمام نمونه‌ها، یـک رابطـهٔ غیرخطـی بـین مقاومـت فشـاری بـا نسـبت‌هـای میکروسیلیس و پلیمر به مواد سیمانی را نشان می‌دهنـد. باتوجه به نمودارهای پراکنده، می‌توان مشاهده نمود کـه یک سهمی درجهٔ دو ممکن است برای نشان دادن تـأثیر میکروسیلیس یا SBR بر مقاومت فشـاری بـتن مناسـب باشد. ارتباط مقاومت فشاری با هر متغیر در اشکال (۷-۹) نشان داده شده‌اند. ارتباط مقاومت فشاری با هر متغیر براساس رگرسیون تعیین می‌شود.



شکل ۷ ارتباط بین مقاومت فشاری و زمان نگه‌داری نمونه در آب



شکل ۸ ارتباط بین مقاومت فشاری با نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی



شکل ۹ ارتباط بین مقاومت فشاری با نسبت پلیمر به مواد سیمانی

ارتباط بین مقاومت فشاری با متغیرهای درنظر گرفته شده را شاید بتوان به‌صورت زیر نمایش داد.

$$F_c = \frac{a_1}{a_2^{(\frac{w}{b})}} \times (11.04 \times \log(t) + 20.22)^{a_3}$$

$$\times(-525.9S^2 + 83.81S + 30.54)^{a_4}$$

$$\times(-346P^2 + 18.72P + 34.49)^{a_5}$$

(۱)

که fc، مقاومت فشاری برحسب مگاپاسگال، w/b نسبت آب به مواد سیمانی، t زمان نگه‌داری نمونه در آب برحسب روز، s نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی، p نسبت پلیمر SBR به مواد سیمانی می‌باشد. a_1، a_2، a_3، a_4 و a_5 ضرایب ثابت می‌باشند. معادلهٔ (۱) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت.

$$\log(F_c) = \log(a_1) - \log(a_2) \times \frac{w}{b} +$$

$$+a_3\times\log(11.04\times\log(t)+20.22)+a_4$$
$$\times\log(-525.9S^2+83.81S+30.54)+$$
$$a_5\times\log(-346P^2+18.72P+34.49)$$

(۲)

کـه a_1، a_2، a_3، a_4 و a_5 را مـی‌تـوان بااسـتفاده از رگرسیون چندگانـهٔ خطـی تعیـین نمـود. مقـادیر ایـن ضرایب در جدول زیر نشان داده شده‌اند. مقدار ضریب همبستگی چندگانه برابر ۰/۹۵ حاصل شده است.

a_5	a_4	a_3	a_2	a_1
0.977	1.005	0.98	0.999	2.637

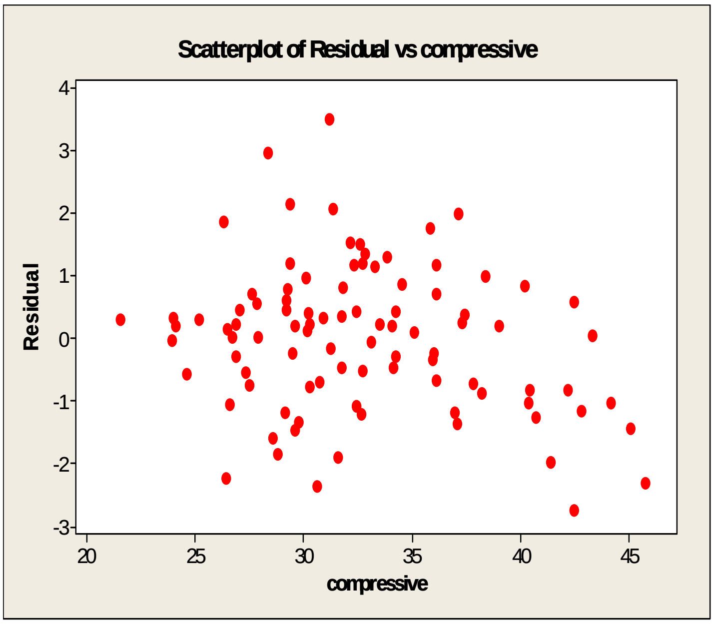
با جای‌گزینی یک به‌جای ضرایبی که نزدیک یک هستند و ساده‌سازی معادلـهٔ بـالا، معادلـهٔ زیـر حاصـل می‌شود.

$$F_c=\frac{49.2}{10^{(\frac{w}{b})}}\times(0.546\times\log(t)+1)$$
$$\times(-17.22S^2+2.74S+1)(-10P^2+0.54P+1)$$

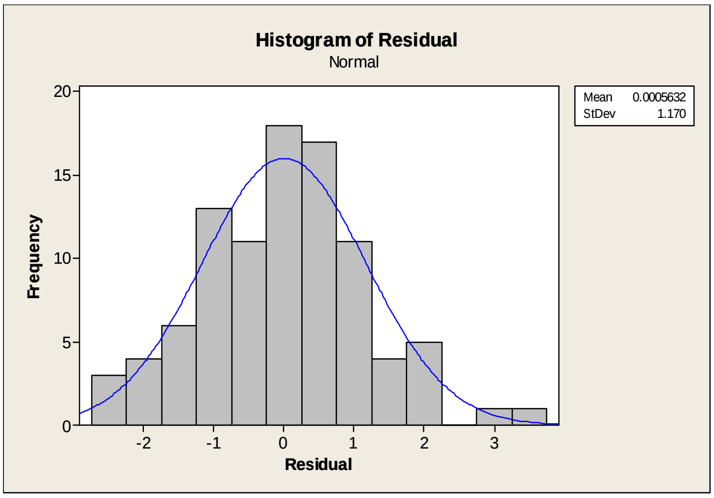
(۳)

از معادلهٔ بالا می‌توان مقاومت فشاری بتن حـاوی میکروسیلیس و SBR را تعیین نمود. به‌منظـور ارزیـابی دقت معادلهٔ بالا، دیاگرام باقی‌مانـده‌هـا (اخـتلاف بـین مقـادیر مشـاهده‌شـده و مقـادیر بـرازش شـده) بـرای مقاومت فشاری ترسیم شده‌اند. دیاگرام باقی‌مانده‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. دیاگرام باقی‌مانـده‌هـا نشان می‌دهد که حداکثر درصـد خطـا بـرای مقاومـت فشاری ۱۰٪ می‌باشد.

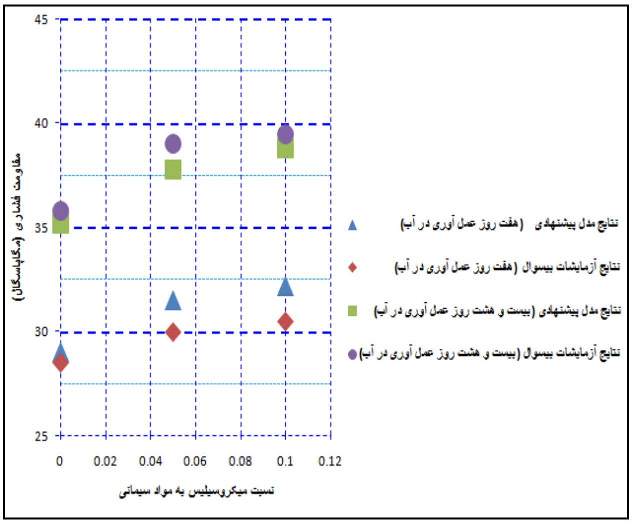
هیستوگرام باقی‌مانده‌ها در شکل (۱۱) نشـان داده شده است. اگرچه توزیع باقی‌مانده‌ها بـه‌طـور کامـل از توزیع نرمال پیروی نمـی‌نمایـد امـا مقـدار مـاکزیمم و میانگین داده‌ها نزدیک صفر می‌باشند.



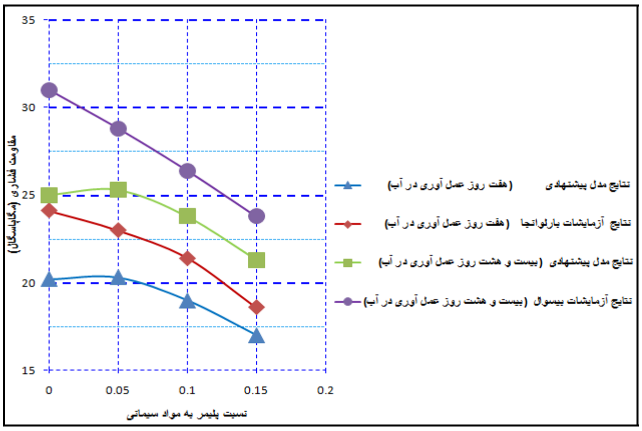
شکل ۱۰ نمودار باقی‌مانده‌ها برای مقاومت فشاری



شکل ۱۱ هیستوگرام باقی‌مانده‌ها برای مقاومت فشاری



شکل ۱۲ مقایسه بین نتایج مقاومت فشاری بیسوال(حاوی میکروسیلیس) و مدل پیشنهادی [21]



شکل ۱۳ مقایسه بین نتایج مقاومت فشاری بارلوانجا (حاوی SBR) با مدل پیشنهادی [22]

مقایسهٔ مدل پیشنهادی با نتایج دیگر محققان

مقایسه بین نتایج آزمایش‌های دیگر محققان که کار آنها مشابه با این تحقیق است، با مدل پیشنهادی انجام شد و دو مورد از آنها در نمودارهای شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج مدل پیشنهادی و مطالعات این دو محقق وجود دارد.

نتیجه‌گیری

۱) تأثیر SBR در افزایش روانی بتن بیشتر از تأثیر میکروسیلیس در کاهش روانی بتن می‌باشد.

۲) در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و روش عمل‌آوری ترکیبی، مقاومت فشاری بتن در ۵٪ پلیمر اندکی افزایش می‌یابد اما زمانی که نسبت پلیمر به مواد سیمانی افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد.

۳) جایگزینی میکروسیلیس تا ۷/۵ درصد، منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود.

٤) کاهش مقاومت فشاری، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی ناشی از تأثیر روان‌کنندگی پلیمر جبران می‌شود. هر دو پدیده باهم موجب می‌شود که مقاومت فشاری تقریباً ثابت باقی بماند.

۵) درصدی از میکروسیلیس که مقاومت فشاری را بهینه می‌کند، با افزودن پلیمر تغییر نمی‌نماید.

٦) از قانون آبرامز با قدری اصلاحات، می‌توان جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و پلیمر استفاده نمود و براساس نمودار اثرات اصلی رابطهٔ زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$F_c = \frac{49.2}{10^{(\frac{w}{b})}} \times$$

$$(0.546 \times \log(t)+1)(-17.22S^2+2.74S+1)(-10P^2+0.54P+1)$$

مدل پیشنهادی امکان پیش‌بینی مقاومت فشاری براساس زمان نگه‌داری در آب (t) و نسبت‌های آب، میکروسیلیس و SBR به مواد سیمانی را فراهم می‌نماید که به‌طور خلاصه با $(\frac{w}{b})$، (s) و (p) نمایش داده شده‌اند.

۷- مدل ریاضی پیشنهادی براساس تعداد آزمایش‌های محدود و در سطح تحقیقاتی ارائه شده است و برای ارائهٔ روابط کاربردی و فراگیر نیاز به انجام آزمایش‌های گسترده‌تر می‌باشد.

مراجع

1. J. Zelic & D. Rusic & R. Krstulovic., "A mathematical model for prediction of compressive strength in cement– silica fume blends", *Cement and Concrete Research*, No. 34, pp. 2319–2328, (2004).
2. V. Bhikshma & K. Nitturkar & Y. Venkatesham., "Investigations on mechanical properties of high strength silica fume concrete", *Asian journal of civil engineering building and housing,* No. 10(3), pp. 335-346, (2009).
3. O.Rozenbaum & R.J.-M.Pellenq & H.Van Damme., "An experimental and mesocopic lattice simulation study of styrene-butadiene latex-cement composites properties", *Materials and structures*, pp. 467-478, (2005).
4. Ru Wang & Pei-Ming Wang & Xin-Gui Li., "physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars", *Cement and Concrete Research 35*, pp. 900-906, (2005).
5. S. Bhanjaa & B. Sengupta., "Modified water–cement ratio law for silica fume concretes", Cement and

Concrete Research 33, p. 447- 450, (2003).

6. G. Barluenga & F. Herna´ndez-Olivares., "SBR latex modified mortar rheology and mechanical behavior", *Cement and Concrete Research 34*, pp. 527–535, (2004).
7. Bing Chen & Juanyu Liu., "Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads", *Construction and Building Materials 21*, pp. 7–11, (2007).
8. A. Beeldens & D.Van Gemert, H.Schorn, Y.Ohama & L.Czarnecki., "From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete", Materials and Structures 38, pp. 601-607, (2005).
9. LIU jun & XU Chang-wei, ZHU Xiao-yan & WANG Ling-ling., "Modification of high performances of polymer cement concrete", *Journal of wuhan university of Technology-Mater,* No. 18(1), pp. 61-68, (2003).
10. João Adriano Rossignol., "Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex", Construction and Building Materials 23, pp. 817–821, (2009).
11. Eui-Hwan Hwang, Young Soo Ko., "Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials".
12. Ke-Ru Wu, Dong Zhang, Jun-Mei Song, "Properties of polymer-modified cement mortar using pre-enveloping method", Cement and Concrete Research 32, pp. 425-429, (2002).
13. Eui-Hwan Hwang & Young Soo Ko & Jong-Ki Jeon., "Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled artifical marble waste fine aggregate", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14,* pp. 265-271, (2008).
14. S. Bhanja & B. Sengupta., "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete", Cement and Concrete Research 35, pp. 743–747, (2005).
15. H. Katkhuda & B. Hanayneh & N. Shatarat., "Influence of silica fume on high strength of light weight concrete", World Academy of Science, Engineering and Technology 58, (2009).
16. K.C. Biswal & Suresh Chandra Sadangi., "Effect of superplasticizer and Silica Fume on Properties of Concrete", Proc. *of Int. Conf.* on Advances in Civil Engineering, (2010).
17. Sandor Popovics., "Strength and related properties of concrete a quantitative approach", John Wiley and sons, (1998).
18. Mehta & p.kumar., "Concrete: Micro structure", properties and materials, (2006).
19. S. Bhanjaa & B. Sengupta., "Investigations on the compressive strength of silica fume concrete using statistical methods", Cement and Concrete Research 32, pp. 1391–1394, (2002).
20. Mohammad Iqbal khan., "Analytical model for strength prediction of HPC consisting of cementitious", Architecture civil engineering environmental, (2009).
21. ACI Committee 548., "State of the Art Report on polymer modified concrete", ACI 548.3R-95

American concrete Institute, Detriot, (1995).

22. LIU Jun XU Chang & wei ZHU Xiao, yan WANG Ling & ling., "Modification of High Performances of Polymer Cement Concrete". *Journal of wuhan university of Technology – Mater,* No. 18(1), (2003).